筐体構造の設計支援システムに関する研究

氏　　名	山　口　貴　吏
生　年　月　日	
本　　籍	北海道
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第638号
学位授与の日付	平成16年3月25日
学位授与の要件	課程博士（学位規則第4条第1項）
学位授与の題目	筐体構造の設計支援システムに関する研究
論文審査委員(主査)	尾田　十八（工学部・教授）
論文審査委員(副査)	梶川　康男（自然科学研究科・教授）山崎　光悦（工学部・教授） 米山　　猛（工学部・教授）坂本　二郎（自然科学研究科・助教授）

学位論文要旨

A design support CAE system for box structures was developed. This system assists in modeling joined structures; in evaluating a strength of bolted structures, production cost, weight balance, and box weight; and in optimizing the box structure by a sensitivity of the bolt strength, a neural network(NN), and a genetic algorithm(GA). The sensitivity of the bolt strength makes possible to produce a optimum bolt layout by an addition of stiffener bolts and a deletion of load concentration bolts. The NN learns relationship between displacement and shape in a FEM analysis database, and predicts the displacements and shape of the box structure. The GA searches a optimum stiffener layout by exchanging the parts in a box structure for differently shaped parts in a part database, and moving parts of the structure to other positions. This system is applied to three optimum problems and evaluate the performance of these optimum methods.

電子機器，電源装置などの外枠である板金筐体は，機器装置本体と比較して付加価値が低いと見なされ，設計合理化上あまり注目されていなかった．しかし，筐体の設計技術は，情報，家電，計測，産業機械などあらゆる製品分野の筐体設計で共通に利用可能なため，全製品分野を総合すると大きな改善効果が期待できる．そこで，板金筐体専用の設計支援システムを開発することにした．筐体構造の設計支援システムは，筐体のモデル化機能，仕様評価機能，および最適化機能から構成される．

(1) 筐体のモデル化機能

筐体構造は，板部材と梁部材からなる部材を組合せ，それらの部材間を締結材（溶接，ボルト，ネジ，リベット）で結合して構成されている．従来，締結部のモデル化は、設計者に任されていたため，設計者の能力や経験によって解析精度の異なるモデルが作成されたり，モデル作成作業に多くの時間を費やしていた．本論文では，どんなレベルの設計者でも，図面に記述されている締結情報（配置方法，寸法など）を設定するだけで，一定のレベルのモデルを簡単に作成できる．また，締結材の配置位置や寸法を最適化の設計パラメータに利用することにより，締結方法に関する最適化問題を扱うことができる．また，ボルト締結部には，ボルトの初期締付け力が既に作用しているが，従来の筐体モデルには，その

影響が含まれいてない．本論文では，ボルトの初期締付け力を考慮したボルトの等価径を求めることにより，解析精度の高いモデルを作成することができる．

(2) 筐体の仕様評価機能

筐体設計は，剛性・強度，耐震性のほかに，生産性を考慮したコスト，転倒性，および軽量化設計のための重量など種々の設計条件を考慮する必要がある．ボルトの強度評価では，モデルに初期締付け状態の影響が含まれているので，有限要素解析との比較により，ボルトの静的強度，疲労強度，およびすべり評価が実施できる．また，従来のコスト見積りは，正確な構造（ＣＡＤ情報）と生産工程（穿孔，曲げなど）が与えられなければ，求めることができなかった．しかし，本論文では，筐体のモデル化機能で作成した筐体モデルからコストを見積るとこができ，設計の初期段階からコストを意識して作業することができる．

(3) 最適化機能

筐体構造の最適化のため，ボルトの追加/削除処理，ニューラルネットワーク，および遺伝的アルゴリズムが利用できる．

ｉ）ボルトの追加/削除処理による最適化

ボルトの強度評価を考慮したボルトの配置問題は，特性が複雑な離散値の問題のため，感度を求めるのは困難である．しかし，ボルトの強度評価結果を感度と同様の方針に従って最適化処理に利用することができる．すなわち，強度評価の安全率が小さなボルトは，全体のボルト強度評価に大きく影響するので，このボルトを改善するために補強のボルトを追加し，強度評価の安全率が大きなボルトは，全体のボルト強度評価にほとんど影響を与えないので，冗長なボルトと考えて削除する．そこで，補強ボルトの追加処理と冗長ボルトの削除処理の繰返によるボルト配置方法の最適化手法を開発した．

本手法を図１に示す筐体ベースのボルト配置問題に適用した．筐体ベースは，２本の柱と２種類の床板をそれぞれ組合わせ，ボルト締結して構成される．締結領域１と締結領域２は，柱と床板１とのボルト締結領域であり，５０（５行×１０列）個のボルト締結箇所がある．締結領域３と締結領域４は柱と床板２とのボルト締結領域であり，１００（１０行×１０列）個のボルト締結箇所がある．柱の上端と床板２の端を固定し，床板１の両端に３種類の荷重条件（F_1，F_2）を設定した．床板１と床板２は互いに接しているので，各締結領域のボルト配置が変化すると，負荷の配分が変わり，他の締結領域のボルト配置に影響を与える構造になっている．このボルト締結構造に対し，ボルトの追加／削除処理を１５０回繰返した結果，終了までに１８本のボルトからなる最良解が３種類得られた．図２に初期状態と３種類の最良解に対するボルトの配置（●）とすべり力（ベクトル）を示す．ただし，ボルトの配置が全て左右対称の結果になっているので，左側の締結領域１と締結領域３のみを図示する．図２（ａ）より，初期のボルト配置に対するすべり力は，締結領域１（締結領域２）の一部のボルトに集中しているのがわかる．図２（ｂ）～（ｄ）のボルト配置は，

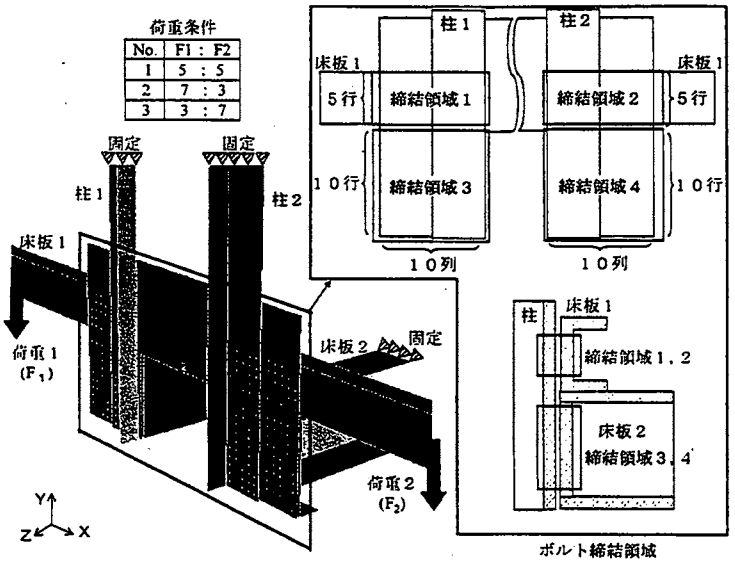


図１　筐体ベースのボルト締結構造

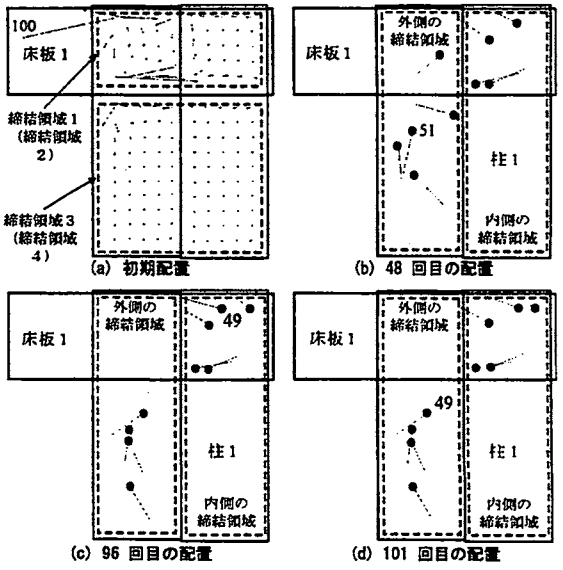
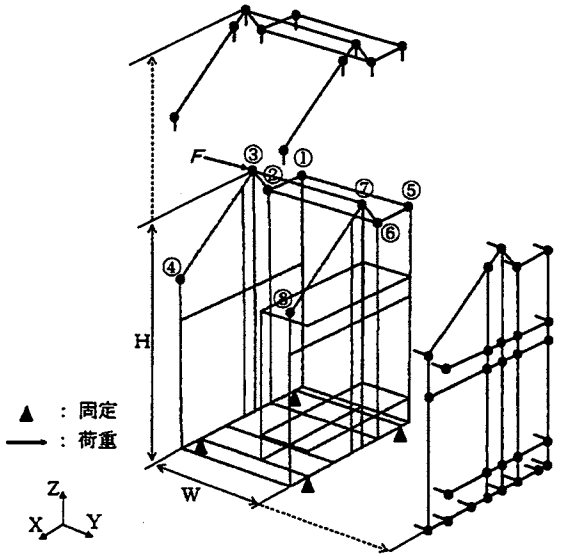


図２　最良解のボルト配置

ほぼ同じ配置になっており，締結領域１（締結領域２）は内側の締結領域，締結領域３（締結領域４）は外側の締結領域にボルトが分布している．締結領域１（締結領域２）の外側の領域は，床板１からの負荷が集中するため，負荷集中ボルトの削除処理により，ボルトが削除されている．締結領域３（締結領域４）の内側の領域は，負荷がかからないため，冗長ボルトの削除処理により，ボルトが削除されている．ボルト本数は，初期配置の約１／１６になっているにもかかわらず，すべり力は，初期の最大すべり力の約１／２になっている．これは，ボルトへの負荷が均等に分配されるように，ボルトが配置されているからである．

ii）ニューラルネットワークによる最適化

有限要素解析を伴う設計では，解析モデルと解析結果からなる多くの解析事例が格納されている．これらの解析事例を用いて，解析モデルと解析結果の対応関係をニューラルネットワークで学習することができたなら，有限要素解析を行うことなく，解析モデルや解析結果を予測することができる．そこで，図３に示す発券端末機筐体の外形寸法(H, W)と変形量の関係をニューラルネットワークで学習し，外形寸法と変形量の予測結果を評価した．まず，図３に示す１３種類の解析事例（学習１から学習１３）をニューラルネットワークで学習した結果，ニューラルネットワークの出力の誤差が０．１mm以内になるまで学習できた．次に，図３に示す１２種類の未学習の解析モデル（予測１から予測１２）を学習済みニューラルネットワークに入力して各節点の変位を予測した結果，有限要素解析との誤差が０．１７mm（最大変位４．７mm）以内であった．これにより，学習済みニューラルネットワークを用いることにより，精度良く変位データを予測できることがわかった．さらに，学習済みニューラルネットワークを用いて，目標変位が得られるような外形寸法を予測した結果，有限要素解析との最大誤差が０．２４mm，および学習精度（０．１mm）の２．４倍以内の精度で予測できた．よって，学習済みニューラルネットワークを有限要素解析の代わりに用いれば，効率よく設計を行うことができる．



		W [mm]				
		500	600	700	800	900
H[mm]	1000	学習1	予測3	学習6	予測8	学習11
	1100	予測1	学習4	予測6	学習9	予測11
	1200	学習2	予測4	学習7	予測9	学習12
	1300	予測2	学習5	予測7	学習10	予測12
	1400	学習3	予測5	学習8	予測11	学習13

図３　発券端末機筐体の形状モデル

iii）遺伝的アルゴリズムによる最適化

遺伝的アルゴリズムは，複雑な評価関数に対しても大域的な最適解を求めることのできる手法であるが，従来のコーディング方法やGAオペレータを用いるだけでは，収束効率が悪くなる場合がある．例えばトポロジー最適化の場合，全要素を配列にコーディングすると配列が極端に大きくなるため，探索空間が膨大になり収束が困難になる．そこで，複数の要素をまとめた部品を考え，部品を考慮した遺伝的アルゴリズムを開発した．

図４に本適用で用いる電源ボックス筐体の概略図を示す．筐体構造は，床，天井，４本の柱，２本の棚柱，柱１－棚柱１－柱２を結合する補強材１，柱３－棚柱２－柱４を結合する補強材２，および棚柱１－棚柱２を結合する補強材３から構成されている．この筐体構造に対し，表１，表２に設計変数，評価項目を示す．ここでは，対象構造の耐震性と軽量化を考慮した補強材の配置問題を対象とする．最適性の判定基準は，図４に示すように，３種類の補強材を４本づつ用いて等間隔に配置した構造（基準構造）の固有振動数と重量を用いる．すなわち，３次までの固有振動数が基準構造の固有振動数よりも高く，重量が基準構造の重量以下となる構造を最適解と判断する．

この問題に対し，従来手法（全補強配置を考慮したコーディング，単純ＧＡ）との収束状況を比較した結果，２／３以下の世代数で最適性の判定基準を満たす解を求めることができた．また，図５に示す従来手法の探索過程と図６に示す本手法の探索過程を比較すると，本手法は，重量（補強本数）の小いさな構造に限定しつつ，固有振動数の分布は全ての世代において広く分布しており，多様性の維持しながらに効率良く探索していることがわかる．

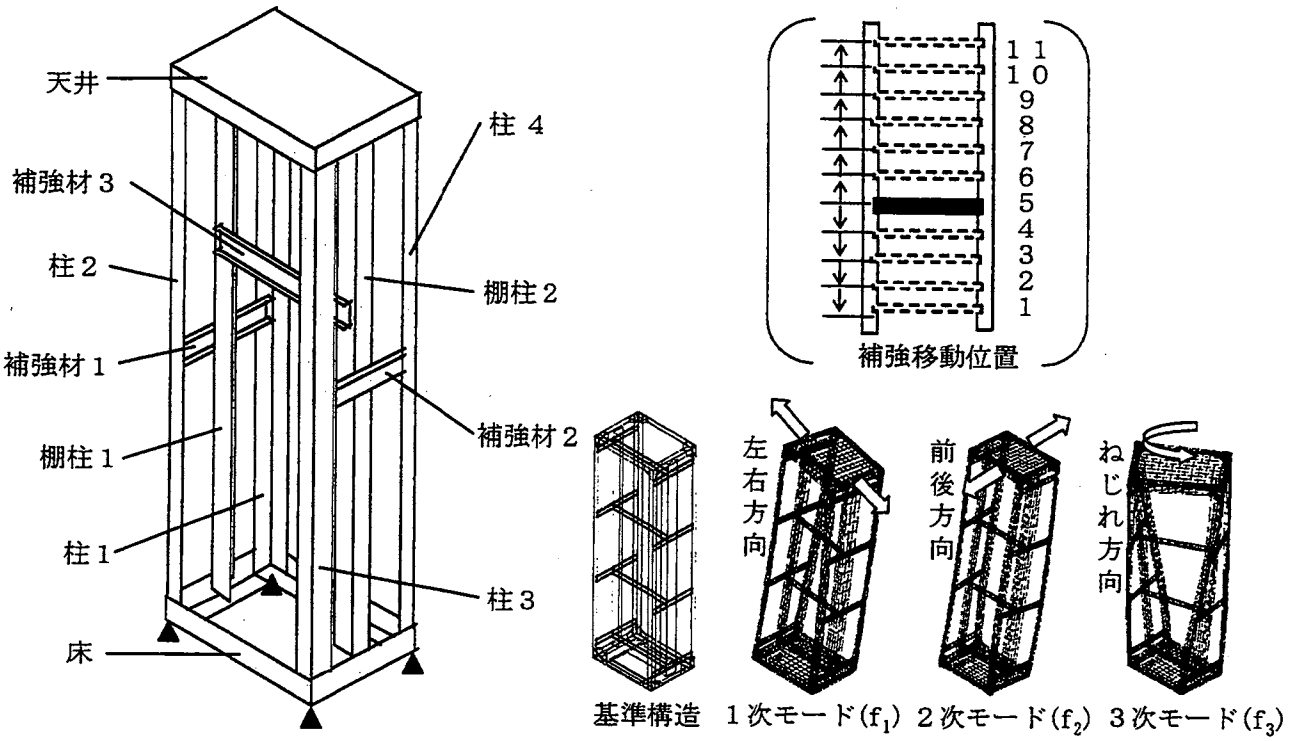


図４　対象構造の概略図

表１　設計変数と制約条件

No.	部品名	設計変数	制約条件
1	補強材１	部品の交換	部品データベース内の部品
2	補強材１	高さ方向の移動量	１１種類の等間隔の移動量
3	補強材２	部品の交換	部品データベース内の部品
4	補強材２	高さ方向の移動量	１１種類の等間隔の移動量
5	補強材３	部品の交換	部品データベース内の部品
6	補強材３	高さ方向の移動量	１１種類の等間隔の移動量

表２　設計変数と制約条件

No.	評価項目	目標値，許容条件
1	重　量	最小化
2	１次の固有振動数	基準構造の１次の固有振動数
3	２次の固有振動数	基準構造の２次の固有振動数
4	３次の固有振動数	基準構造の３次の固有振動数

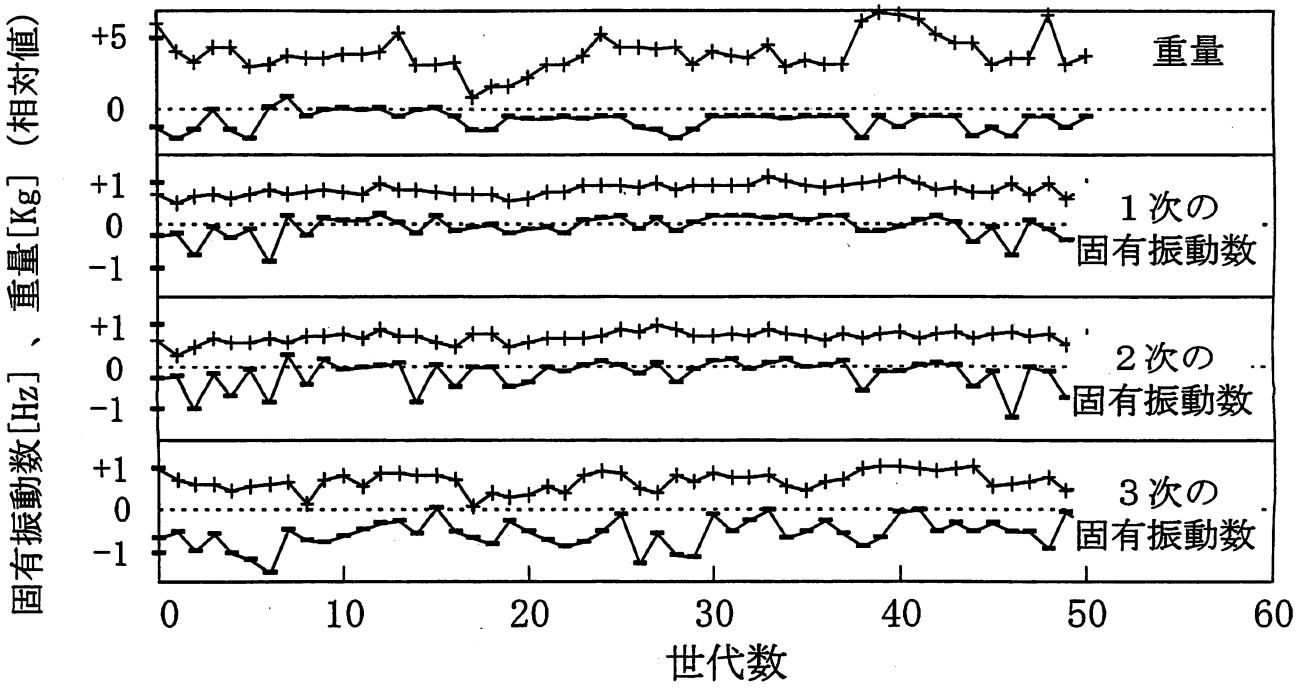


図５　手法２の各世代に対する固有振動数と重量

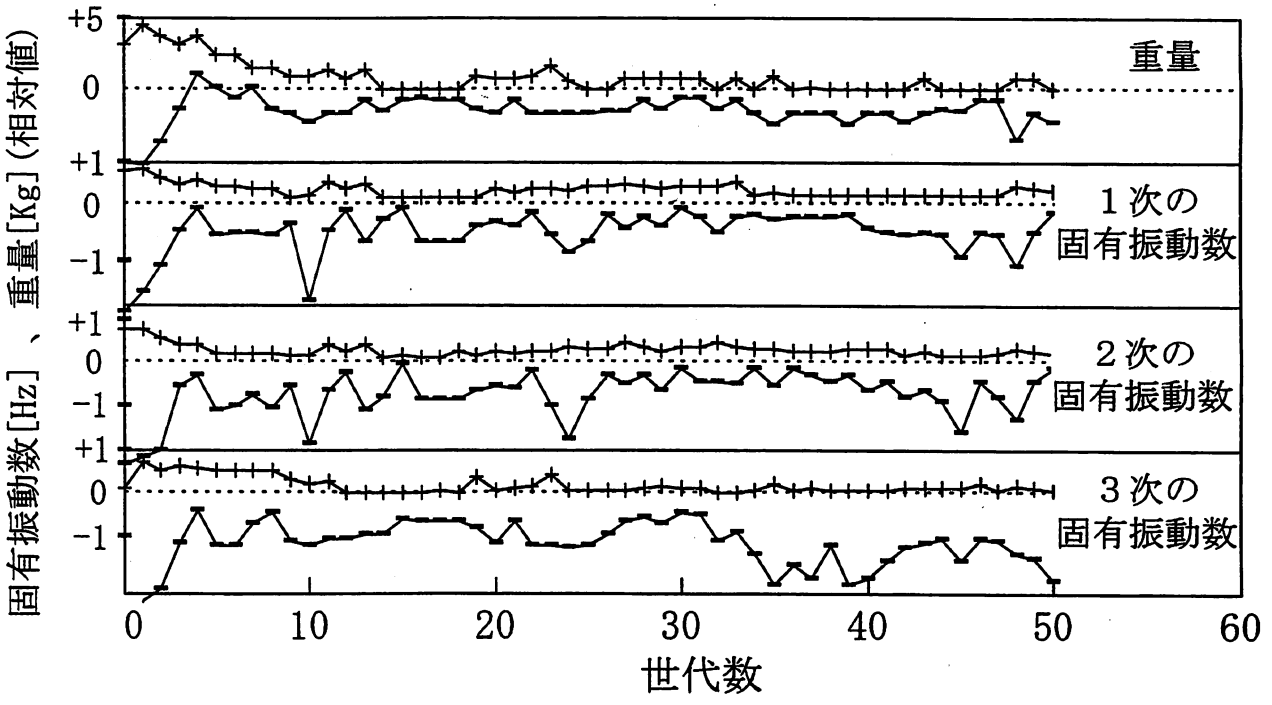


図６　手法５の各世代に対する固有振動数と重量

学位論文審査結果の要旨

当該論文に関し、平成16年1月28日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について検討を加え、2月3日の口頭発表後、第2回審査委員会を開催し、協議の結果以下の通り判定した。なお口頭発表における質疑を最終試験に代えるものとした。

本論文は電子機器や電源装置などの外枠としての板金筐体に対する最適設計を行う設計支援システムを構築し、その有効性を実用機器筐体に対して評価したものである。

論文は筐体のモデル化機能から始まる。ここでは筐体を構成する部材とそれらの結合部に対し配置方法やその寸法を設定するのみで、簡単に対応する構造モデルを作成できる方法を提案している。特にボルト締結部に対しては、その初期締付け力を考慮したモデル化手法を考案している。このような設定モデルに対し、剛性、強度、耐震性はもちろん生産性も考慮したコスト評価を行える設計仕様評価の機能を与え、これらの機能を制約や目的関数とする設計問題の構築方法を示している。また具体的な筐体の設計問題を、まず部材間のボルト締結部に限定して、その最適配置問題として解いており、さらに発券端末機や電源ボックス筐体に対する問題ではニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムを用いて具体的な解の導出を行い、構築したシステムの有効性を明らかにしている。以上より本論文は筐体設計分野としての工業技術に資する所が大きく、学術博士論文に値するものと判断する。